

機関番号：55301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21860086

研究課題名（和文） ウミガメの遊泳に学んだ推進機構に関する実験的研究

研究課題名（英文） An Experimental Study on the Sea Turtle-like Propulsor

研究代表者

細谷 和範 (HOSOTANI KAZUNORI)

津山工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：60509107

研究成果の概要（和文）：

ウミガメの遊泳に学んだ簡単な羽ばたき型の推進機構について、本研究では定常流中及び周期的に流速が変動する脈動流中での推力を調べた。回流水槽内において、シーケンス制御された DC サーボモーターによって駆動される羽ばたき翼が発生する推力を測定した結果、脈動流中では振り下ろすタイミングによって推力が大きく異なり、減速する流れに合わせて駆動することで大きな推力を得ることが確認された。推力を選択的に発生できることは、波に伴う数秒周期の往復流が卓越する沿岸の浅海域において、エネルギーの消費を抑えた推進を可能にする。このように、羽ばたき翼型の推進機構は沿岸域に特化した水中ロボットの推進機として期待できることが示された。

研究成果の概要（英文）：

Marine animals swim skillfully in various flow fields by controlling their thrust force, thus providing an opportunity to develop engineering technology for remote-controlled operated vehicles. In this study, we investigated the propulsion of the sea turtles and developed a propulsor with a sequential controlled oscillating fin driven by DC-servo motors. Thrust force was measured not only in a uniform flow, but also in a cyclic asymmetrical flow. In the cyclic asymmetrical flow, large thrusts were observed when the fin begins to downswing as the flow decelerates. This result suggests that this propulsion mechanism can make for efficient energy-saving technology. This propulsion mechanism can also be adopted in the asymmetrical flow, even in shallow waters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010 年度	980,000	294,000	1,274,000
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：環境工学，流体工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：Biological Engineering, Fluid mechanics, Underwater robot, 水中ロボット, 生物流体, 羽ばたき翼

1. 研究開始当初の背景

近年、水域の環境調査に遠隔操作の水中ロボット (Remotely Operated Vehicle, 以後 ROV と呼称する) が活用されているが、測量船が入っていけないような浅瀬のある沿岸の極浅海域では運用が難しい。また打ち寄せ

る波が通過する際に発生する往復流により、ROV を思うように推進させることができないこともあり、極浅海域での環境調査活動はもっぱら人力に頼らざるを得ない状況にある。

本研究では、浅瀬のようにスクレーが使えない場所での推進機構として、沿岸付近に

生息するウミガメの前肢を模した羽ばたき型の推進機構を検討した。ウミガメは羽ばたき動作によって前肢の翼面に発生する揚力を推力として利用しているものと見られ、プロペラのような回転翼と同様に、流れに対して迎角をつけて前肢を振り下ろすことで推力を発生している。羽ばたき型の推進機構は海草や網などの漂流ゴミが巻き付く心配が少なく、また ROV が浅瀬に乗り上げても水平方向の羽ばたき動作による前進が可能である等の利点がある。ウミガメを模したロボットに関する研究は既に数多く行われ、高性能のウミガメ型 ROV も開発されている。しかしながら、沿岸の波によって周期的に変化する流れ場において、羽ばたき型の推進機構が発生する推力の特徴や発生メカニズムについては十分に検討されていない。

2. 研究の目的

羽ばたき型の推進機構を ROV に搭載する場合、モーターの動きを往復運動に変換する過程を経るために、エネルギー効率はスクルーに勝つことはないと思われる。しかしながら、羽ばたき型の推進機構は浅瀬での運用が可能となる利点がある。また波によって生じる数秒周期の往復した流れ場において、流れの状況に合わせて前肢を振り下ろすことでエネルギー消費が少ない推進機になる可能性もある。本研究では、簡単な翼素理論に基づいて製作した羽ばたき型の推進機について、定常流中及び脈動流中での推力、特に脈動流中において振り下ろすタイミングと推力との関係を把握することを目的とする。

本報告では、はじめに脈動流内の水理実験を行うために、小型回流水槽を用いて作り出した脈動流の一様性について述べる。つづいて羽ばたき型の推進機構について、ウミガメの前肢をモデルにして製作した推進機構の推力測定結果について述べる。加えて、本報告では推進機構を実機（教材用の水中ロボット）に応用した事例についても述べる。

3. 研究の方法

(1) 小型回流水槽を用いた脈動流の評価

周期的に流速が変化する脈動流中での水理実験を行うため、小型回流水槽（西日本流体技研製 P-100）にプログラム可能なコントローラー（PLC）を接続して脈動流を発生させた。水槽測定部はアクリル製で、長さ 2m、幅 0.3m、高さ 0.3m（水深 0.2m）の開水路状となっている。定常流の流速 U (cm/s) はインバーターモーターの駆動周波数 F (Hz) に比例し、以下の関係を有する。

$$U = 2.078 \times F \quad \dots \dots (1)$$

しかしながら、脈動流中においては水塊の慣性力や跳水による圧力変動に伴い、駆動周波数と流速の関係は式(1)の通りにはならない。本研究では PLC に正弦波状の駆動周波数を与え、流速の時系列及び測定部の断面流速分布を測定した。本研究で検討する推進機構は沿岸域で見られる周期数秒のさざ波に伴う往復した流れ場内での運用を想定しているため、脈動流の周期 T は 2 秒及び 5 秒とした。振幅は式(1)において 20cm/s の平均流速に対して 10cm/s と 20cm/s の振幅に相当する駆動周波数を与えた。

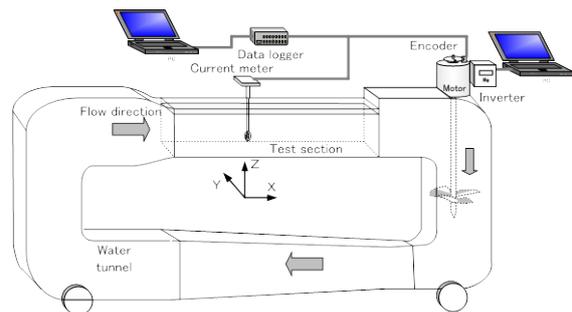


図 1 PLC を接続した小型回流水槽

(2) 羽ばたき型推進機構の試作と推力の測定

本研究では日本の沿岸でよく見られるアカウミガメの遊泳を参考に推進機構を設計した。アカウミガメは図 2 に示すように翼形状の前肢にひねりを加えて振り下ろす動作を行う。ひねりの角度は前肢の根元から先端に向かって鉛直に近くなっており、プロペラなどの回転翼と同じく、前肢に発生する揚力を用いて推進するメカニズムを有している。翼素に発生する揚力は図 3 に示されるように翼に向かう流速と迎角に依存する。翼に向かう流速は一定の遊泳速度 U_0 と振り下ろす動作で発生する翼の移動速度 V_r との合成速度 V である。

$$V = \sqrt{U_0^2 + V_r^2} \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 V_r は翼素が持つ角速度 ω と回転中心からの距離 r より $V_r = r\omega$ となる。この時、水平軸 (X 軸) に対する翼角を θ とするとき迎角 α は次式で求められる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_r}{U_0} - \theta \quad \dots \dots (3)$$

翼素に発生する揚力 L と抗力 D は次式のようになる。

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \quad \dots \dots (4)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$$

ここで、 C_L と C_D はそれぞれ翼形状及び迎角によって変化する揚力係数と抗力係数を示し、 A は翼面積を示す (A =弦長 C ×翼幅 b)。さらに、移動する翼には見かけの付加質量が加わる。振り下ろす方向について考慮すると、揚力の発生方向の付加質量は主翼の翼弦長 C を直径とする円の流体質量の慣性モーメントであり、次式のように表される。

$$F = \rho b \pi \left(\frac{C}{2}\right)^2 \frac{d(V \sin \alpha)}{dt} \dots \dots (5)$$

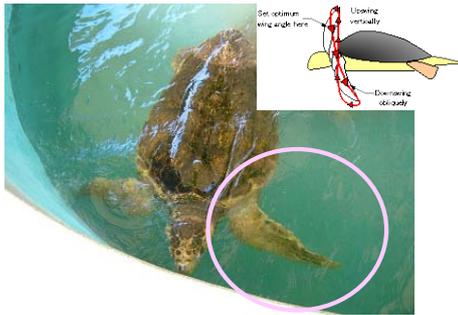


図2 アカウミガメの振り下ろし動作

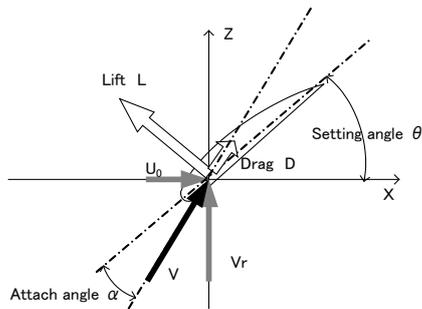


図3 翼素にかかる流れと力

以上の各式を用いて x 軸方向の推力がおおよそ 10N 程度になるように設計した推進機構を図4に示す。回転軸側の翼素は長さ 40mm、弦長 80mm であり、先端側の翼素は長さ 70mm、弦長 70mm である。翼形はいずれも NACA4418 であり、厚さは約 10mm である。二枚の翼間の局所的な乱れの発生を抑制するためにバネ支持された 10mm 幅の翼を 3 枚挿入するとともに翼全体をナイロン製のストッキングで覆い、極力凹凸を減らすよう工夫した。二枚の翼素の翼角（フェザリング）の制御や回転の動作は市販のホビー用制御基盤（共立電子製 RBIO-6A）を用いて行い、翼素に接続されたラジコン用サーボモーター（14.2kg-cm, 0.17sec / 60deg.）をシーケンス制御した。

本機構に与える動作はおおよそ 2 秒の周期で遊泳するウミガメの前肢の動きに倣い、素早く振り下ろし、ゆっくりと振り上げる動作パターンを与えた（図5）。1 サイクルの羽ばたき動作の周期は 2.1 秒とし、翼ははじめに回

転角 $\gamma = -45^\circ$ （振り下ろした状態を起点とする）からゆっくりと振り上げ $\gamma = +45^\circ$ に達した後、次の振り下げ動作を行うよう設定した。

（動作パターン A）

この動作パターンは、振り下げ動作の開始後、翼角を維持して振り下げ動作を終了し、その直後に翼角を流れと平行（翼角 $\theta = 0^\circ$ ）にする。

（動作パターン B）

この動作パターンは、実際のウミガメに近い動きである。振り下げ動作の開始後、振り下げ動作の中間（ $\gamma = 0^\circ$ ）に達した後、振り下ろし終了までの 45° 間に翼角を $\theta = 0^\circ$ に戻し、振り下げ終了時に翼角が $\theta = 0^\circ$ になるように制御する。

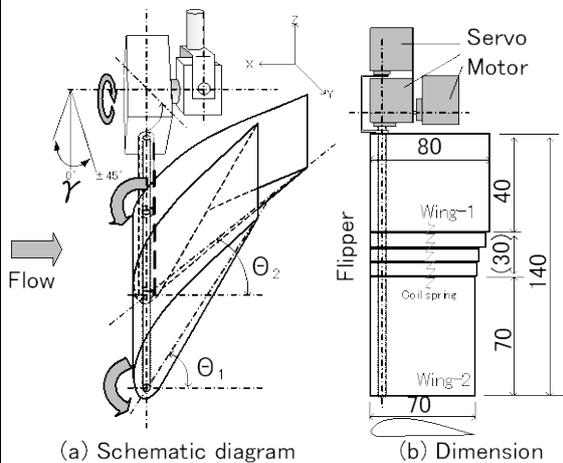


図4 2枚の翼素で構成される推進機構（図の左側から一様な流れ U_0 が印加される）

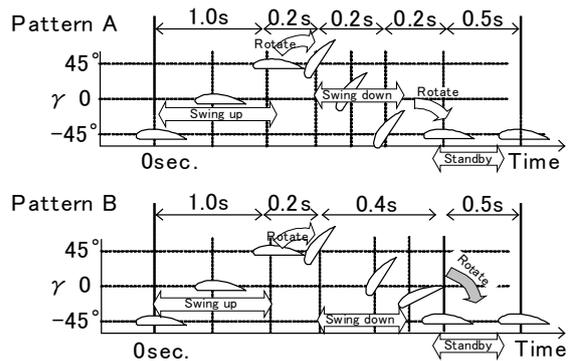


図5 振り下ろしパターン（A, B）

ここで、翼角 θ は前方からの流速 U_0 と振り下げの周速度 $r\omega$ との合成速度に対して翼面上の揚力が最も大きくなる迎角 α （式(3)）になるように設定した。推進機構の推力測定は図6に示すように、供試体を回流水槽の測定部に固定した三分力計（共和電業製 LSM-B-50N）に取付け、推進方向の F_x と水平方

向の F_y を測定した。実験条件は、推進機構が一定速度で推進している状態を想定し、定常流 ($U_0=0\text{cm/s}$, 10cm/s , 20cm/s , 30cm/s) と脈動流中の推力を計測した。脈動流は以下の2ケースを与えた。

- ①周期 5 秒で流速 $U=11\text{cm/s}\sim 14.5\text{cm/s}$
- ②周期 2 秒で流速 $U=18\text{cm/s}\sim 35\text{cm/s}$

ここで、翼角を理論的に設定することは難しいため、定常流で用いた設定を与えた。

- ①周期 5 秒のケース： $U_0=10\text{cm/s}$ (定常流) の条件に合わせた翼角
- ②周期 2 秒のケース： $U_0=20\text{cm/s}$ (定常流) の条件に合わせた翼角

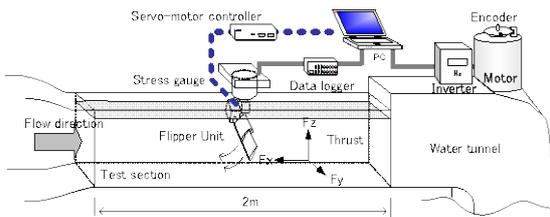


図 6 実験装置の概観

(3) 実機 (教材ロボット) への応用

羽ばたき型推進機構を実機に搭載し、推力と遊泳時の特徴を調べた。本研究では本機構が回転するスクリューに比べて安全であることから、小学生向けの公開講座で利用できる簡単なロボット教材に適用した。ロボットは図 7 に示すように、長さ 19cm、幅 14cm 及び厚さ 5cm の大きさを有する。サーボモーターで動作する前肢は PIC マイコンでシーケンス制御される。振り上げから振り下ろしまでの動作は振り下ろしに 0.3 秒、待機時間 0.2 秒、振り上げに 0.5 秒の計 1 秒のシーケンス動作を行う。前肢には樹脂板製のヒレがクリップ留めされ、翼は $\pm 45^\circ$ の範囲で自由に動けるようになっている。このロボットの性能評価は前節の機構と同様に定常流中及び脈動流中において推力測定を行った。

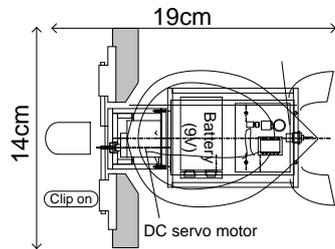


図 7 開発したウミガメロボット教材

4. 研究成果

(1) 回流水槽による摂動流の一様性

本節では定常流用の式(1)を使って 20cm/s の平均流速に対し周期 2 秒で、振幅 20cm/s

に相当する条件を PLC に与えた結果について述べる。図 8 に測定部断面中央付近の流速の時系列を示す。流速の最大値は式(1)とほぼ一致するものの、最小値並びに平均値は大きく異なる。周期性について見ると、実測値は設定通り正弦波状であるものの、減速時間が短く、加速時間が長くなっている。ここで、PLC の設定値 (灰色の線) に対し、実測の位相は設定値よりも位相が進んでいるように見えるがこれは位相が進んでいるのではなく、水槽内のプロペラで発生した水流が測定部に到達するまでの時間によって位相が数波長分遅れたものである。

流速の一様性について、図 9 に水槽測定部中央付近の断面流速分布を示す。各時刻とも水面近くの断面の上部で一様性が崩れるものの、中央付近では概ね一様の流速分布を示していることが分る。この傾向は周期 5 秒のケースでも同様であった。以上のことから、開水路状の測定部を持つ回流水槽で周期数秒の脈動流を発生させた場合、完全に正弦波状の流速変化にはならないが、流速は周期的に変化し、断面流速は水面付近を除いて概ね一様性が維持されることが確認された。

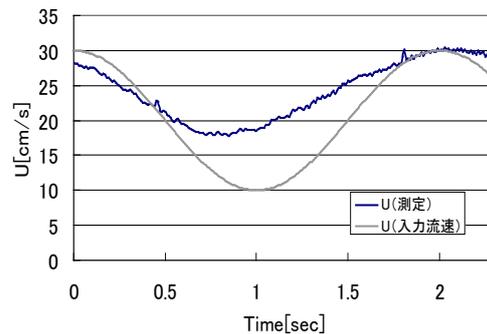


図 8 摂動流の時系列

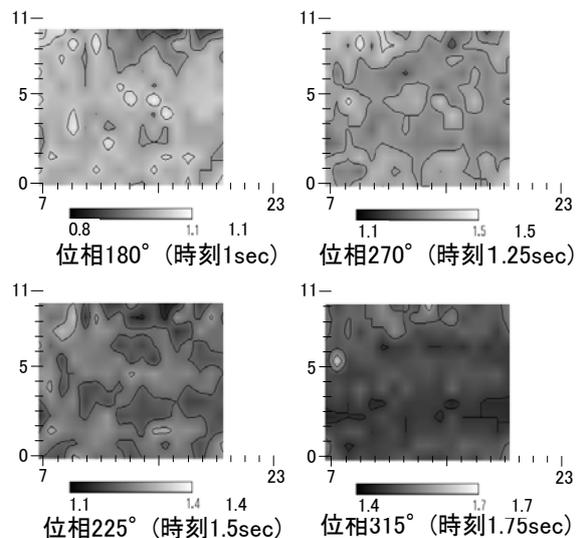


図 9 測定部の断面流速分布 (U/U_{ave})

(2) 各流れ場における推力の特徴

① 定常流中における推力

推進機構が静水中及び定常流中で発生する推力の時系列を図 10 に示す。静水条件において、翼角を一定に維持しながら振り下げる動作パターン A の場合、振り下げ時の F_x はおよそ 3N, F_y はおよそ 1N を示し、振り下げが完了する $\gamma=45^\circ$ まで大きな推力が維持される。ここで、翼素理論によって計算される推力は $F_x=8.7\text{N}$, $F_y=0.2\text{N}$ であり、倍程度の差が見られる。一方、翼角を振り下ろしの途中から水平に戻すパターン B の推力 F_x はおよそ 2.5N を示し、振り下ろし後半にかけて減少する反面、 F_y は増加傾向を示している。なお、両パターンの推力のピークは同程度であった。

各流速条件に対し、振り下ろし動作 1 ストローク分を平均した平均推力を図 11 に示す。パターン A は静水時において 0.30N を示し、パターン B は 0.35N を示した。流速に併せて翼角を設定しているが、流速が大きくなるに従い推力は両パターンとも減少し、 $U_0=30\text{cm/s}$ ではおよそ 0.2N となった。本機構を ROV に搭載した場合、筐体の抵抗によるが 30cm/s 程度の速度が出せるものと見込まれる。

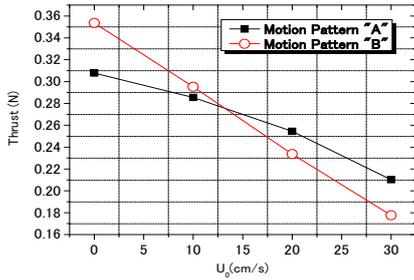


図 11 流速と平均推力の関係

② 脈動流中の推力

脈動流中で推力を発生する際、流速の周期的変動に対して振り下げのタイミングによって推力は異なる。図 12 に前肢の動作開始から 1.2 秒後（振り下げるタイミング）の位相 ϕ と平均推力 F_m の関係を示す（ここで脈動流の位相は流速が最も低い時を基準 (0°) とした）。脈動流中での平均推力はパターン B の方がパターン A よりも大きくなる傾向を示した。両パターンとも $\phi=0^\circ$ 付近の推力が最も大きく、 $\pm 180^\circ$ 付近で最も小さい。平均最大値と最小値の比 ($F_{m,max}/F_{m,min}$) は、周期 5 秒（脈動振幅 3.6cm）のケースで約 1.1、周期 2 秒（脈動振幅 6cm）のケースで約 1.5 となり、脈動流の振幅が大きい程、推力差が大きくなっている。

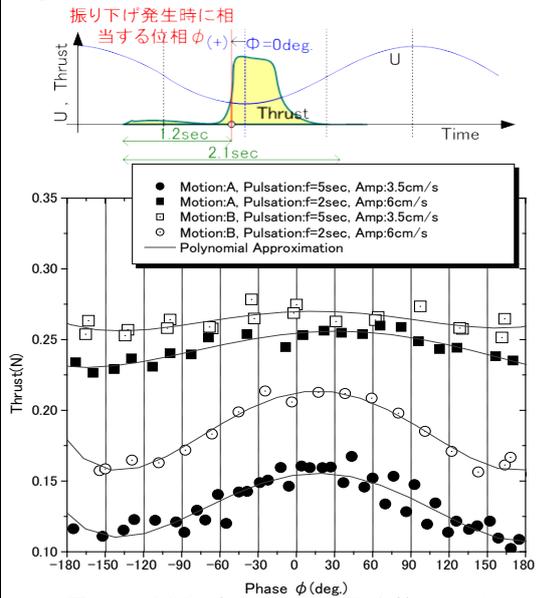
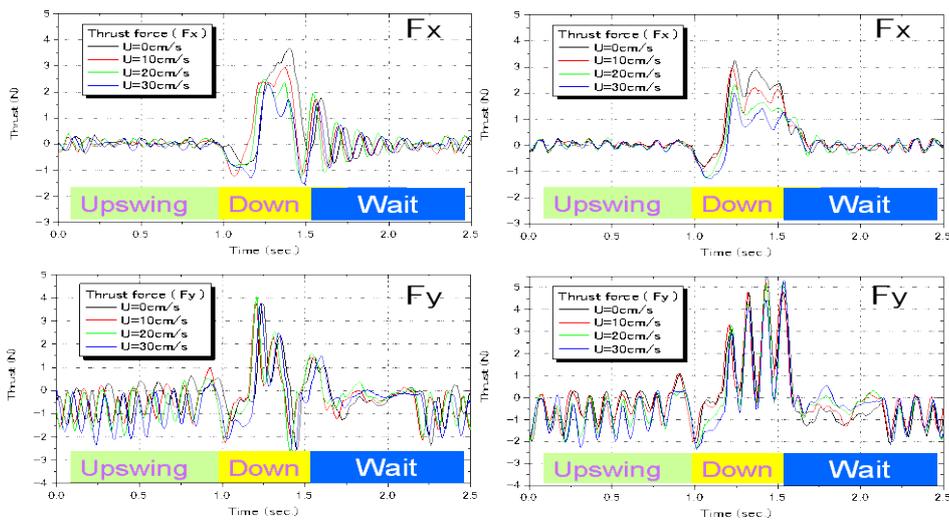


図 12 脈動流における平均推力の分布



(a) Pattern A

(b) Pattern B

振り下ろし後、翼を水平に閉じる 振り下ろし後半に翼を水平に閉じる

図 10 静水中及び定常流中の推力

また、脈動する流れが加速時（ ϕ が正の範囲）では減速中（ ϕ が負）に比べ推力が若干大きいように見えるが、発生した脈動流の非対称性や測定データ数の不足のため断定できるに至っていない。このように今後精査が必要であるものの、図 12 の推力が位相 ϕ に対して正弦波状に分布したことは、脈動周期に対して振り下ろし動作が十分に早い場合、式(2)の U_0 に脈動する流速成分を代入しても式(4)の推力式が成立することが推測される。

以上のように、羽ばたき型の推進機構が脈動流中で示す推力は前肢を振り下ろすタイミング（位相 ϕ ）に対して正弦波状の分布を示し、流れの減速時にのみ翼を振り下ろす事で効率的に推力を得ることができると示された。

(3) 教材ロボットの推力

図 7 の筐体の推力を図 6 の水槽内で測定したところ、静水条件では振り下ろし時に 0.5N の推力が発生し、1 ストローク分の平均推力はおよそ 0.17N であった。定常流中では $U_0=20\text{cm/s}$ より大きくなると平均推力は負を示した。実際にロボットを遊泳させたところ、およそ 20cm/s で遊泳した。

また、前節と同じように周期 2 秒で流速 $U=18\text{cm/s}\sim 35\text{cm/s}$ で変化する脈動流中において平均推力を測定した結果について、位相差と推力の関係を図 13 に示す。平均推力は図 12 と同様に振り下げのタイミングによって変化し、実機に搭載した本ケースでも位相差 $\phi=0^\circ$ （流速が遅いときに振り下ろす）のときに最大を示した。

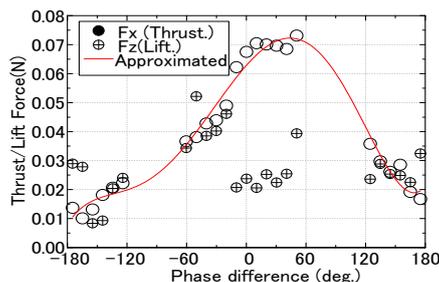


図 13 摂動流におけるロボット教材の平均推力

5 今後の課題

以上のように、ウミガメの遊泳に学んだ羽ばたき型の推進機構は脈動する流れのタイミングに合わせて駆動することで、エネルギー消費の少ない推進機構になる可能性がある。しかしながら、本研究では脈動流中における推力発生メカニズムについて流体力学的に十分に説明及び考察ができておらず、今後の課題として残っている。

今後は翼の推力発生メカニズムを調べる予定であるが、停止及び加減速を伴って駆動する羽ばたき翼が作り出す流れ場は非常に複雑である。例えばレーザーシート光で可視化した教材用ロボットの振り下ろし直後の流れ場（図 14）を見ると、粒子パターンは推力の発生に寄与する噴流状の流れの他に、翼間のよどみ領域の形成や、翼から剥離した渦が確認できる。効率的な推進力を得るにはこの複雑な流れ場のコントロールが必要であるが、脈動流中では更に複雑な流れになることから、今後は PIV（画像粒子計測法）や数値モデルを用いて定量的に推力の発生メカニズムを調べる予定である。

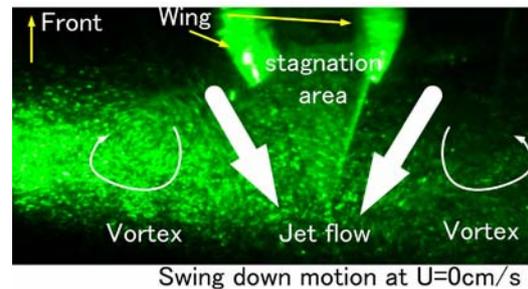


図 14 静水中で前肢の振り下ろし直後に形成された流れ場（図は筐体の底部後方を撮影し、図の上方が進行方向となる）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

(1) Development of simple underwater robots with oscillating propulsion fins to encourage interest in engineering, Kazunori HOSOTANI, Kotaro NISHIKAWA, Mitsunori NAKAO, 査読なし, Proc. of Techno-Ocean 2010 International Conference

(2) 細谷和範, ウミガメの前肢の動きに学んだ簡単な推進機構に関する実験的研究（一様流中及び脈動流中での推力の特徴）, 査読なし, 日本機械学会講演論文集, No. 115-1, 281-282, 2011.

〔学会発表〕（計 1 件）

(1) 大山祐也, 細谷和範, 小型回流水槽による脈動流の一様性に関する実験的研究, 査読なし, 日本機械学会中国四国支部第 4 1 回学生員卒業研究発表講演会前刷集 p. 147, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細谷和範 (HOSOTANI KAZUNORI)

津山工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：60509107